ПОВОЛЖСКИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. 2022. № 3. С. 292 – 306
Povolzhskiy Journal of Ecology, 2022, no. 3, pp. 292–306
https://sevin.elpub.ru

Оригинальная статья
УДК 579.68+556.531.5(282)(470.22)
https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-292-306

СОСТОЯНИЕ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА р. ЛОСОСИНКИ (ПРИТОКА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА) И КАЧЕСТВО ВОДЫ ПО МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Е. М. Макарова ✉, Е. В. Теканова, Н. М. Калинкина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН
Россия, *185030*, *г. Петрозаводск*, *просп. А. Невского*, *д. 50*

Поступила в редакцию 22.12.2021 г., после доработки 11.05.2022 г., принята 28.06.2022 г.

Аннотация. Представлены результаты исследования бактериопланктона (общая численность, сапрофитные, углеводородокисляющие, фенолрезистентные бактерии, общее микробное число и бактерии группы кишечной палочки) в урбанизированном притоке Онежского озера в 2015 г. Река Лососинка в нижнем течении протекает по территории г. Петрозаводска (Карелия) и принимает 14 неочищенных стоков городской ливневой канализации. Обнаружены различия во временно́й динамике численности бактерий-индикаторов нефтяного загрязнения, санитарного состояния, сапробности на фоновом и городском участках реки. Эти изменения не связаны с гидрологическим и температурным режимом реки и отражают влияние стока загрязняющих веществ с городской территории на формирование бактериального сообщества. Выявлено достоверное увеличение всех изученных показателей количественного развития бактериопланктона на городском участке реки по сравнению с фоновым участком. В озерной воде количество гетеротрофных бактерий разных эколого-трофических групп снижается в 8 – 16 раз уже в 500 м от устья вследствие разбавления. Показано, что за четыре года произошло достоверное снижение численности углеводородокисляющих бактерий в речной воде и увеличение количества санитарно-показательных микроорганизмов. По уровню развития индикаторных групп бактерий р. Лососинка на территории Петрозаводска оценивается как загрязненная нефтепродуктами и органическим веществом фекального происхождения и непригодная для использования в целях рекреации.
Ключевые слова: река Лососинка, Онежское озеро, загрязнение, бактериопланктон, биоиндикация, качество воды, рекреация

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

Для цитирования. *Макарова Е. М.*, *Теканова Е. В.*, *Калинкина Н. М.* Состояние бактериопланктона р. Лососинки (притока Онежского озера) и качество воды по микробиологическим показателям // Поволжский экологический журнал. 2022. № 3. С. 292 – 306. https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-292-306

✉ *Для корреспонденции*. Лаборатория гидробиологии Института водных проблем Севера Карельского научного центра РАН.

ORCID и *e-mail адреса*: Макарова Елена Михайловна: https://orcid.org/0000-0003-0219-8092, emm777@bk.ru; Теканова Елена Валентиновна: https://0000-0003-0030-3565, etekanova@mail.ru; Калинкина Наталия Михайловна: https://0000-0001-6363-0470, cerioda@mail.ru.

© Макарова Е. М., Теканова Е. В., Калинкина Н. М., 2022

ВВЕДЕНИЕ

Развитие городской среды способствует увеличению антропогенной нагрузки на городские водные объекты, которые обычно представляют собой пруды, малые реки и озера. В результате загрязнения нефтепродуктами, тяжелыми металлами, токсикантами, биогенными и органическими веществами (ОВ) такие водные экосистемы довольно быстро деградируют (Павлова, 1999; Read et al., 2015; Капустина, Митрукова, 2018; Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2021). Городские водные объекты не только теряют рекреационную ценность, но могут представлять угрозу для здоровья человека. Река Лососинка, в нижнем течении протекающая по территории г. Петрозаводска с населением 300 тыс. человек, не исключение. Река является излюбленным местом отдыха петрозаводчан, выгула домашних животных, принимает стоки городской ливневой канализации. Воды р. Лососинки поступают в Петрозаводскую губу Онежского озера, которая служит источником питьевой воды для г. Петрозаводска. В связи с этим весьма актуальным является контроль экологической ситуации в р. Лососинке.

В малых реках развитие фито- и зоопланктона ограничивается рядом факторов (небольшие глубины, взмучивание, течение и др.), их системы, как правило, функционируют по принципу «микробной петли» (Копылов и др., 2006). Поэтому биоиндикация качества воды по показателям бактериопланктона является более надежной, кроме того, дает возможность оценить развитие биологических процессов самоочищения в речной системе (Биоиндикация…, 2007; Гаретова, Левшина, 2007; Lear et al., 2009 и др.), дифференцировать виды загрязнения по развитию отдельных эколого-трофических групп бактерий.

Численность отдельных гетеротрофных компонентов бактериопланктона р. Лососинки изучалась в летний период 2000-х гг. (Тимакова, 2013; Теканова и др., 2015). Однако полноценных микробиологических исследований, позволяющих оценить количественное и функциональное развитие бактерий за весь период открытой воды, до сих пор не проводилось.

Цель настоящего исследования – проанализировать пространственное и временное распределение бактериопланктона в р. Лососинке и оценить качество воды по микробиологическим индикаторам.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Река Лососинка – малый водоток полугорного типа с перепадами высот и перекатами. Ее длина составляет 25 км, ширина – 4–5 м, скорость течения – 0.3 – 0.8 м/с (Каталог озер и рек…, 2001). Река в нижней трети русла протекает по территории г. Петрозаводска и впадает в Петрозаводскую губу Онежского озера. Речная вода относится к ультрапресным, мезополигумозным водам гидрокарбонатно-кальциевого типа (Крупнейшие озера…, 2015). На городской территории река принимает 14 стоков ливневой канализации без какой-либо очистки, загрязняющих воду нефтепродуктами, взвешенным и легкоминерализуемым ОВ (Теканова и др., 2021).

Отбор проб воды на микробиологический анализ проводился 1 раз в месяц с апреля по ноябрь 2015 г. на четырех станциях: ст. L-1 – за пределами городской черты выше по течению, ст. L-2 – порожистый участок с перепадом высоты около

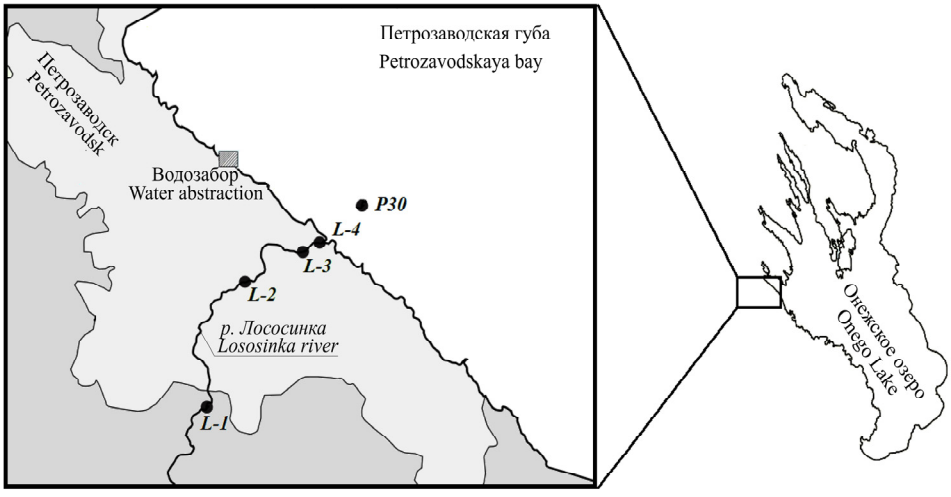

Рис. 1. Район исследований и точки отбора проб на р. Лососинке и в Петрозаводской губе Онежского озера
Fig. 1. Study area and sampling points on the Lososinka River and in the Petrozavodskaya Bay of Lake Onego

2 м на городской территории; ст. L-3 – плесовый участок реки на городской территории; L-4 – устье реки на городской территории (рис. 1). На каждой станции было отобрано 8 проб воды. В августе 2015 г. был выполнен отбор проб в Петрозаводской губе Онежского озера на ст. P30 (глубина 14.3 м) на расстоянии 490 м от устья р. Лососинки. Весенний паводковый период на р. Лососинке в 2015 г. проходил в апреле – мае, небольшой осенний – в ноябре. Вода прогревалась до 11.5 – 13.5ºС в июне – августе (рис. 2).

Пробы брались в поверхностном слое воды в медиальной части реки 2-метровым шестом с креплением для пробирок. Пробы в стерильных полипропиленовых пробирках с винтовой крышкой (V = 50 мл) транспортировались в лабораторию в термоконтейнерах с хладоэлементами, посевы выполнялись через 2–3 ч. Микроскопирование фиксированных формальдегидом (4% конечная концентрация в пробе) проб воды проводилось в течение полугода.

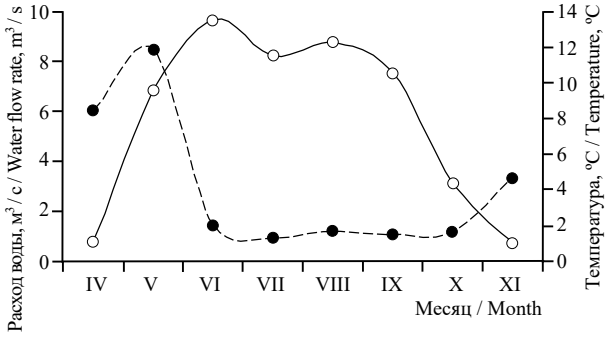

Рис. 2. Температура воды (●) и расход воды (○) в р. Лососинке в даты отбора проб 2015 г.
Fig. 2. Water temperature (●) and river discharge (○) in the Lososinka River at the sampling dates of 2015

Общая численность бактерий определялась методом прямого счета на нуклеопоровых фильтрах производства Whatmann (Whatman GmbH, Германия) *(*$D_{пор}$ = = 0.2 мкм) на люминесцентном микроскопе (увеличение ×1600) (МИКМЕД-2, Россия) с предварительным окрашиванием клеток акридиновым оранжевым (Handbook of Methods…, 1993). Размеры клеток измеряли при помощи компьютерной программы ММС (MultiMedia-Catalog). Биомассу бактерий рассчитывали по методике (Кузнецов, Дубинина, 1989). Сапрофитные бактерии (СБ) выращивали на среде РПА, фенолрезистентные (ФРБ) – на минеральной среде с добавлением фенола в течение 5 сут при 22ºС, углеводородокисляющие (УВБ) – на среде Диановой – Ворошиловой с добавлением очищенного агара Дифко, солярки и эмульгатора ТВИН-80 (Родина, 1965; Кузнецов, Дубинина, 1989) в течение 10 сут при 22ºС. Для определения общего микробного числа (ОМЧ) колонии выращивали на РПА при 37ºС в течение 24 ч. Для определения бактерий группы кишечной палочки (БГКП) проба воды фильтровалась через мембранные фильтры Millipore (Merck KGaA, Германия) ($D_{пор}$ = 0.45 мкм), колонии выращивались на фильтрах, помещенных на агаризованную среду Эндо, при 37ºС в течение 24 ч. После инкубации выполнялся цитохромоксидазный тест (МУК 4.2.1884-04, 2004).

Для корректной оценки качества воды по общей численности бактериопланктона в соответствии с классификацией, предложенной О. П. Оксиюк с соавторами (1993) (световая микроскопия с окрашиванием клеток эритрозином), был использован ранее полученный авторами коэффициент пересчета на эпифлуоресцентный метод для мезотрофного водоема 2.06±0.19 (медиана и ее ошибка), n = 54, *min – max* 1.68 − 2.45. Коэффициент был получен при параллельном подсчете общей численности бактерий из одной пробы воды двумя способами микроскопирования.

При статистической обработке полученных данных определяли медиану (*Me*), доверительный интервал (*tm*) и размах варьирования (*min – max*). Наличие разницы в уровне развития бактерий оценивали с помощью непараметрического теста Вилкоксона. Статистическую обработку материала проводили в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В период исследований 2015 г. вода на всех изученных участках реки (ст. L-1, L-2, L-3, L-4) характеризовалась высокими показателями цветности, общего железа, бихроматной окисляемости, содержания минерального и общего фосфора, взвешенного вещества и $БПК_5$ (Теканова и др., 2021). Увеличение концентраций этих химических показателей в воде на городской территории (ст. L-2, L-3, L-4) по сравнению с фоновым участком (ст. L-1) в целом не превышало 40%. Концентрация и насыщение воды кислородом были достаточными для развития аэробных бактерий, pH воды – нейтральным. Статистический анализ показал, что достоверные различия по всем изученным химическим параметрам между фоновым и городским участками реки отсутствуют (Теканова и др., 2021). Некоторые из показателей химического состава воды представлены в табл. 1.

Таблица 1. Химические показатели и качество воды р. Лососинки в период открытой воды 2015 года*
Table 1. Chemical indicators and water quality of the Lososinka River during the open water period in 2015*

Показатель / Index	Загородный участок (ст. L-1) / Suburban riverbed (station L-1)	Городской участок (ст. L-2, L-3, L-4) / Urban riverbed (stations L-2, L-3, L-4)
pH	6.5–7.6 (6)** 7.2±0.3	6.4–7.6 (18) 7.3±0.1
Цветность воды, град / Water color, degrees	94–136 (6) 111±11	102–201 (18) 137±9
Насыщение воды O_2, % / % of O_2 saturation	84–91 (8) 88±2	78–94 (24) 89±1
ХПК, мг O_2/л / COD, mg O_2/l	12.5–39.9(6) 19.0±4.3	10.9–34.2 (18) 23.3±2.3
БПК$_5$, мгO_2/л / BOD_5, mgO_2/l	1.04–3.85 (7) 1.18±0.10	1.22–3.61 (21) 1.54±0.05
$P_{мин}$, мкг/л / P_{min}, µg/l	5.2–56 (5) 35±11	3.6–62 (15) 38±12
Нефтепродукты, мг/л / Petroleum, mg/l	<0.02 (4)	<0.02–0.04 (8)

Примечание. * По данным Е. В. Текановой с соавторами (2021); ** над чертой – *min–max (n)*, под чертой – *Me±tm,* в скобках – количество проб.

Note. * – According to E. V. Tekanova et al. (2021); ** – above the line – *min–max* (*n*), under the line – *Me±tm*.

Динамика общей численности бактериопланктона и ФРБ в течение периода открытой воды на городских участках р. Лососинки была схожей с их сезонными изменениями в фоновом участке (рис. 3, *а*, *б*). Изменения общей численности бактерий были выражены слабо. Возрастание количества ФРБ в воде отмечалось в апреле и ноябре и определялось гидрологическим режимом реки (см. рис. 2). Следует отметить, что ФРБ в условиях высокоцветных вод Карелии нельзя считать исключительно индикатором загрязнения воды углеводородами, так как фенольные соединения входят в состав гумусовых веществ (Тимакова, 2013). Сезонная изменчивость количества бактерий – индикаторов загрязнения воды нефтепродуктами и ОВ, в том числе фекального происхождения, на городском отрезке реки существенно отличалась от фоновой. На фоновом участке реки (ст. L-1) увеличения количества УВБ, ОМЧ и БГКП не наблюдалось даже во время паводка, что может косвенно указывать на отсутствие загрязнения прибрежных территорий за пределами городской черты нефтепродуктами и ОВ фекального происхождения. На городском участке реки максимальные величины УВБ отмечались весной и осенью во время паводка (см. рис. 2). Повышение БГКП и ОМЧ наблюдалось летом и осенью (рис. 3, *в*, *д*, *е*) и не было связано с гидрологическим режимом реки, либо с повышением температуры воды в летнюю межень (см. рис. 2). Сходные изменения в период открытой воды бактерий-индикаторов фекального загрязнения с максимальным количеством в осенний период были обнаружены ранее при сезонных исследованиях бактериопланктона в литоральной зоне Онежского озера, где отсутствовали источники загрязнения воды (Теканова, Макарова, 2017). Повышение численности СБ в фоновом участке реки происходило в апреле и ноябре

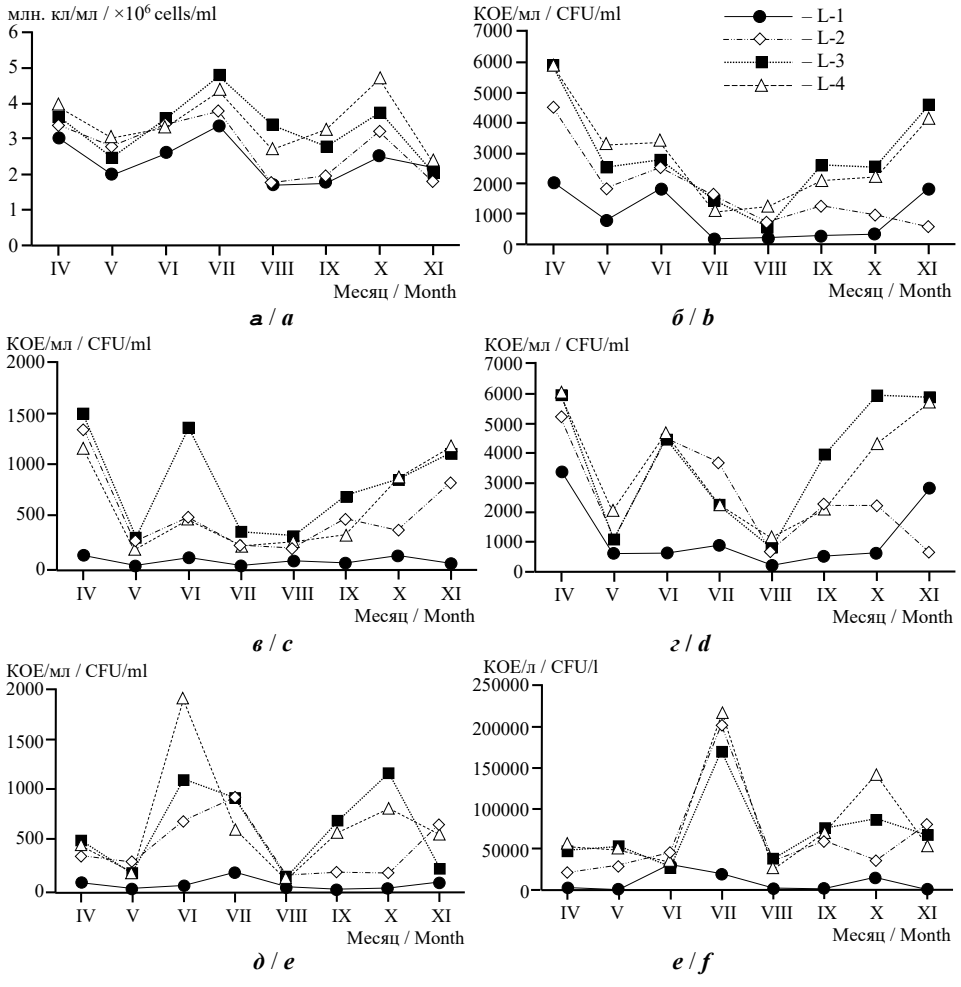

Рис. 3. Динамика количественных показателей бактериопланктона в р. Лососинке в период открытой воды 2015 г.: *а* – общая численность бактериопланктона, *б* – ФРБ, *в* – УВБ, *г* – СБ, *д* – ОМЧ, *е* – БГКП

Fig. 3. Dynamics of the quantitative indicators of bacterioplankton in the Lososinka River during the open water period of 2015: *a* – total bacterioplankton abundance, *b* – phenol resistant bacteria, *c* – hydrocarbon oxidizing bacteria, *d* – saprophytic bacteria, *e* – total microbial count, *f* – coliform bacteria

за счет поступления легкоминерализуемого ОВ и сапрофитной микрофлоры с паводковыми водами (см. рис. 2), а на городском участке реки – весной, летом и осенью. Как и в случае с ОМЧ и БГКП, возрастание количества СБ летом и осенью не было связано с гидрологическим режимом реки (рис. 3, *г*). Временны́е изменения

УВБ, ОМЧ, БГКП и СБ на городском участке реки отражают влияние ливневой канализации и склонового стока с городской территории на формирование бактериального сообщества.

Пространственное распределение изученных показателей количественного развития бактериопланктона в р. Лососинке приведено в табл. 2. Их медианные значения возрастали на городском участке реки (ст. L-2, L-3, L-4) по сравнению с загородным (ст. L-1). Максимальные величины наблюдались в нижнем течении на ст. L-3 и L-4, которые находятся под наибольшим влиянием ливневых сточных вод. Больше других на городской территории по сравнению с загородным участком увеличивалось количество бактерий-индикаторов нефтяного (УВБ) и фекального (ОМЧ и БГКП) загрязнения воды, в среднем в 9 – 18 раз. Количество СБ и ФРБ на городском участке реки возрастало в среднем в 3.5 – 5 раз, общей численности бактериопланктона – в 1.4 раза. Медианные значения общей численности, СБ, ФРБ, УВБ, ОМЧ и БГКП на ст. L-2, L-3, L-4 выходят за пределы доверительных интервалов для этих групп бактерий в загородном участке (ст. L-1).

Таблица 2. Характеристики бактериопланктона р. Лососинки в период открытой воды 2015 г.
Table 2. Bacterioplankton characteristics in the Lososinka River during the open water period of 2015

Показатель / Index	Загородный участок / Suburban riverbed	Городской участок / Urban riverbed		
	Ст. / Station L-1	Ст. / Station L-2	Ст. / Station L-3	Ст. / Station L-4
Общая численность бактериопланктона, $\times 10^6$ кл./мл / Total bacterioplankton abundance, $\times 10^6$ cells/ml	1.73–3.35 2.36±0.55	1.75–3.77 3.0±1.07	2.09–4.76 3.5±0.77	2.3–4.68 3.3±0.82
Средний объем клетки*, мкм^3 / Average cell volume*, μm^3	0.175–0.234 0.202	0.24–0.259 0.252	0.208–0.258 0.228	0.170–0.245 0.217
Биомасса бактерий*, мг/л / Bacterial biomass*, mg/L	1.28–1.60 1.43	1.73–2.93 2.35	1.89–3.64 2.64	1.85–3.41 2.51
СБ, $\times 10^3$ КОЕ/мл / Saprophytic bacteria, $\times 10^3$ CFU/ml	0.21–3.37 0.64±0.23	0.64–5.21 2.2±2.02	0.85–5.98 4.24±3.25	1.18–6.05 3.33±1.78
ФРБ, $\times 10^3$ КОЕ/мл / Phenol resistant bacteria, $\times 10^3$ CFU/ml	0.14–2.03 0.54±1.13	0.55–4.52 1.42±0.77	0.53–5.91 2.57±0.92	1.11–5.93 2.77±1.48
УВБ, $\times 10^3$ КОЕ/мл / Hydrocarbon oxidizing bacteria, $\times 10^3$ CFU/ml	0.02–0.13 0.07±0.05	0.20–1.36 0.44±0.17	0.30–1.54 0.79±0.57	0.20–1.20 0.42±0.44
ОМЧ, $\times 10^3$ КОЕ/мл / Total microbial count, $\times 10^3$ CFU/ml	0.03–0.21 0.07±0.04	0.19–0.91 0.34±0.33	0.16–1.18 0.81±0.50	0.15–1.90 0.79±0.29
БГКП, $\times 10^3$ КОЕ/л / Coliform bacteria, $\times 10^3$ CFU/L	1.0–30.30 2.95±8.96	22.44–203.30 41.95±21.83	30.0–169.70 60.32±25.13	28.10–217.7 56.29±21.93

Примечание. Над чертой – *min–max*, под чертой – *Me±tm*; * – объем клеток и биомасса бактерий измерялись три раза (весной, летом и осенью).

Note. Above the line – *min–max*, under the line – *Me±tm*; * – cell volume and bacterial biomass were measured three times (in the spring, summer and autumn).

Увеличение биомассы бактериопланктона на городском участке реки (в 1.8 раз) происходит за счет увеличения общей численности бактериопланктона

(см. табл. 2), так как объем клеток на всех изученных участках относительно одинаковый. Средний для всех изученных станций объем бактериальной клетки был довольно большим и достигал 0.24±0.01 мкм^3 (n = 1325). Крупные бактерии обычно обнаруживаются при эвтрофировании и обогащении природных вод ОВ (Потаенко, 1979), применительно к р. Лососинке – не только антропогенного, но и природного гумусового происхождения.

Различия в количественном развитии бактерий в пределах городского участка реки не столь очевидны. Тест Вилкоксона показал, что ст. L-2, L-3, L-4 являются однородными по количеству СБ, ОМЧ и БГКП. В то же время общая численность бактериопланктона и количество ФРБ на ст. L-2 оказалось значимо меньше, чем на ст. L-3 (p = 0.05 и 0.03 соответственно) и на L-4 (p = 0.02 и 0.02 соответственно). Это могло определяться тем, что ст. L-2 расположена выше ст. L-3 и L-4 и принимает во́ды лишь 5 из 14 ливневых стоков. Кроме того, было выявлено значимое превышение количества УВБ на ст. L-3 по сравнению со ст. L-2 (p = 0.02) и со ст. L-4 (p = 0.04). В районе ст. L-3 ранее располагался Онежский тракторный завод. В период исследований там велись земляные работы по строительству жилого комплекса, что способствовало вымыванию из почвы накопленных нефтепродуктов.

Сравнение общей численности и количественного развития некоторых эколого-трофических групп бактериопланктона в приустьевом участке реки (ст. L-4) и в прибрежной зоне Петрозаводской губы Онежского озера (ст. Р30) (см. рис. 1) в августе 2015 г. показало, что в озерной воде уже на расстоянии около 500 м от устья количество СБ, ФРБ и УВБ сокращается в 8 – 16 раз. Общая численность бактериопланктона снижается в 2 раза (табл. 3). Главной причиной такого снижения является масштабное разбавление речных вод озерными в летнее время и хороший водообмен в заливе. Объем водных масс в губе составляет 1.55 км^3, период водообмена – 1.6 месяца (Lozovik et al., 2019).

Таблица 3. Количественные характеристики бактериопланктона в р. Лососинке и Петрозаводской губе Онежского озера в августе 2015 года
Table 3. Quantitative bacterioplankton characteristics in the Lososinka River and the Petrozavodskaya Bay of Lake Onego in August 2015

Показатель / Index	Ст. / Station L-4	Ст. / Station P30
СБ, КОЕ/мл / Saprophytic bacteria, CFU/ml	1180	78
ФРБ, КОЕ/мл / Phenol resistant bacteria, CFU/ml	1230	157
УВБ, КОЕ/мл / Hydrocarbon oxidizing bacteria, CFU/ml	270	27
Общая численность бактериопланктона, $\times 10^6$ кл/мл / Total bacterioplankton abundance, $\times 10^6$ cells/ml	2.72	1.26

Сравнение медианных значений количественного развития некоторых эколого-трофических групп бактериопланктона в р. Лососинке летом 2011 – 2012 (Теканова и др., 2015) и 2015 гг. выявил значимое снижение количества УВБ. В то же время загрязненность воды санитарно-показательной микрофлорой (ОМЧ и БГКП) достоверно увеличилась в 2015 г. (табл. 4).

Таблица 4. Количественное развитие некоторых групп гетеротрофного бактериопланктона на городском участке р. Лососинки в августе 2011 – 2012 и 2015 годов
Table 4. Quantitative development of some groups of heterotrophic bacterioplankton in the urban part of the Lososinka River in August 2011−2012 and 2015

Показатель / Index	2011–2012 гг.	2015 г.
СБ, ×10³ КОЕ/мл / Saprophytic bacteria, ×10³CFU/ml	0.23–6.80 (22) 2.54±0.52	0.72–4.70 (16) 2.99±2.33
ОМЧ, ×10³ КОЕ/мл / Total microbial count, ×10³ CFU/ml	0.09–0.33 (4) 0.20	0.15–1.90 (16) 0.66±0.47
ФРБ, x10³ КОЕ/мл / Phenol resistant bacteria, ×10³ CFU/ml	0.03–3.11 (19) 0.90±0.56	0.67–3.40 (16) 1.42±1.13
УВБ, ×10³ КОЕ/мл / Hydrocarbon oxidizing bacteria, ×10³CFU/ml	0.14–1.29 (8) 0.51±0.51	0.20–0.50 (16) 0.26±0.18
БГКП, ×10³ КОЕ/л / Coliform bacteria, ×10³ CFU/L	5.55–42.73 (10) 10.41±7.84	28.07–21.74 (16) 41.95±107.89

Примечание. Над чертой – *min–max*, под чертой – *Me±tm*, в скобках – количество проб.
Note. Above the line – *min–max*, under the line – *Me±tm*, the number of samples is in brackets.

Качество воды оценивалось по развитию индикаторных групп бактериопланктона на двух участках реки – в загородном (ст. L-1) и в городском (ст. L-2, L-3, L-4). Общая численность бактерий свидетельствовала об удовлетворительном качестве воды в загородном участке р. Лососинки (табл. 5). Невысокие численности санитарно-показательных бактерий, бактерий – индикаторов сапробности, углеводородокисляющих и фенолрезистентных бактерий указывают на отсутствие загрязнения воды легкоминерализуемым ОВ, в том числе фекального и нефтяного происхождения. На территории г. Петрозаводска микробиологические индикаторы сапробности также определяют удовлетворительное качество воды в целом. Однако уровень развития УВБ, ФРБ, ОМЧ, БГКП отражает наличие в речной воде в пределах городской территории достаточного трофического ресурса в виде нефтепродуктов и ОВ фекального происхождения для классификации этой части реки как загрязненной.

Таблица 5. Качество воды в р. Лососинке по индикаторным группам бактериопланктона в 2015 году
Table 5. Water quality in the Lososinka River by indicator groups of bacterioplankton in 2015

Показатель / Index	Загородный участок / Suburban riverbed	Городской участок / Urban riverbed	Литературный источник / Reference
Общая численность бактериопланктона / Total abundance	Чистая / Clear water	Удовл. / Satisfactory cleanliness	Оксиюк и др., 1993 / Oksiyuk et al., 1993
СБ / Saprophytic bacteria	Чистая / Clear water	Удовл. / Satisfactory cleanliness.	Оксиюк и др., 1993 / Oksiyuk et al., 1993
ОМЧ / Total microbial count	Норма / Norm	Загрязненная / Contaminated water	СанПиН 2.1.4.1175-02 / SanPiN 2.1.4.1175-02
БГКП / Coliform bacteria	Норма / Norm	Загрязненная / Contaminated water	СанПиН 2.1.5.980-00 / SanPiN 2.1.5.980-00
ФРБ / Phenol resistant bacteria	Норма / Norm	Загрязненная / Contaminated water	Руководство по…, 1992 / Handbook…, 1992
УВБ / Hydrocarbon oxidizing bacteria	Норма / Norm	Загрязненная / Contaminated water	Руководство по…, 1992 / Handbook…, 1992

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования бактериопланктона р. Лососинки в 2015 г. выявили временные и пространственные изменения в общей численности бактериопланктона и в количестве гетеротрофных бактерий отдельных эколого-трофических групп. Изменения во временно́й динамике ОМЧ, БГКП и СБ на городском участке реки по сравнению с фоновым, не связанные с гидрологическим и температурным режимом реки, отражали признаки антропогенной трансформации речной системы. Анализ пространственного распределения бактериопланктона в р. Лососинке выявил значимое повышение всех показателей количественного развития водных бактерий в черте г. Петрозаводска по сравнению с загородным участком. На фоновом участке р. Лососинки все изученные микробиологические показатели находились в пределах, установленных для незагрязненных вод. В черте города общая численность бактериопланктона и уровень развития сапрофитной микрофлоры соответствовали удовлетворительному качеству воды. Количество бактерий – индикаторов нефтяного и фекального загрязнения воды в 9 – 18 раз превышало показатели в загородном участке реки и характеризовало воду как загрязненную. По сравнению с исследованиями 4-летней давности количество УВБ в речной воде было ниже в два раза, а санитарно-показательной микрофлоры – выше в 3 – 5 раз. В соответствии с существующими санитарными нормами р. Лососинка в пределах г. Петрозаводска была непригодна для рекреационного использования в период исследований. По данным Роспотребнадзора по Республике Карелия (Новости, 2021), превышение санитарных норм по количеству колиформных бактерий в р. Лососинке сохранялось и в последующие годы (2017, 2020 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Биоиндикация экологического состояния равнинных рек / под ред. О. В. Бухарина, Г. С. Розенберга. М. : Наука, 2007. 407 с.

Гаретова Л. А., *Левшина С. И.* Бактериопланктон речных экосистем горно-таежной зоны // Биология внутренних вод. 2007. № 4. С. 25 – 33.

Капустина Л. Л., *Митрукова Г. Г.* Санитарно-экологическая оценка качества воды Дудергофских озёр (г. Санкт-Петербург) по результатам многолетних микробиологических наблюдений // Российский журнал прикладной экологии. 2018. Т. 16, № 4. С. 16 – 21.

Каталог озер и рек Карелии / под ред. Н. Н. Филатова, А. В. Литвиненко. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

Копылов А. И., *Косолапов Д. Б.*, *Романенко А. В.*, *Косолапова Н. Г.*, *Мыльникова З. М.*, *Минеева Н. М.*, *Крылов А. В.* Гетеротрофные микроорганизмы в планктонных трофических сетях речных экосистем // Успехи современной биологии. 2006. Т. 126, № 3. С. 273 – 284.

Крупнейшие озера-водохранилища северо-запада европейской территории России : современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2015. 376 с.

Кузнецов С. И., *Дубинина Г. А.* Методы изучения водных микроорганизмов. М. : Наука, 1989. 288 с.

МУК 4.2.1884-04. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. Методические указания. М. : Роспотребнадзор, 2004. 41 с.

Новости // Управление федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Карелия. Петрозаводск, 2021. URL: https://10.rospotrebnadzor.ru/search/index.php?q=кишечная+палочка&where=&how=d&PAGEN_1=2 (дата обращения: 23.11.2021).

Оксиюк О. П., *Жукинский В. Н.*, *Брагинский Л. П.*, *Линник П. Н.*, *Кузьменко М. И.*, *Клениус В. Г.* Комплексная экологическая классификация поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, № 4. С. 62 – 76.

Павлова О. А. Состояние фитопланктона малых водоемов г. Санкт-Петербурга под влиянием урбанизированного ландшафта // Региональная экология. 1999. № 4. С. 70 – 74.

Потаенко Ю. С. Численность, биомасса и продукция бактериопланктона // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1979. С. 80 – 102.

Родина А. Г. Методы водной микробиологии : практическое руководство. М. : Наука, 1965. 364 с.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В. А. Абакумова. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. 318 с.

СанПиН 2.1.4.1175-02. Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М. : Минздрав РФ, 2003. 20 с.

СанПиН 2.1.5.980-00. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. М. : Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. 18 с.

Теканова Е. В., *Макарова Е. М*. Эколого-санитарное состояние прибойной литорали Онежского озера // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем III : материалы Международной конференции. СПб. : Свое издательство, 2017. С. 322 – 324.

Теканова Е. В., *Макарова Е. М.*, *Калинкина Н. М*. Оценка состояния воды притоков Онежского озера в условиях антропогенного воздействия по микробиологическим и токсикологическим показателям // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 44 – 52. https://doi.org/10.17076/lim35

Теканова Е. В., *Макарова Е. М*., *Калинкина Н. М*. Экологическая оценка качества воды урбанизированного притока Онежского озера по химическим показателям // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. Т. 87, № 3. С. 75 – 84. https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.3.75-84

Тимакова Т. М. Микробиологическая оценка состояния урбанизированных притоков Петрозаводской губы Онежского озера // Водные объекты города Петрозаводска : учебное пособие. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2013. С. 74 – 77.

Handbook of Methods in Aquatic Microbial Ecology / eds. P. F. Kemp, J. J. Cole, B. F. Sherr, E. B. Sherr. Washington : CRC Press, 1993. 800 p.

Lear G., *Boothroyd I. K.* G., *Turner S. J*., *Roberts K*., *Lewis G. D*. A comparison of bacteria and benthic invertebrates as indicators of ecological health in streams // Freshwater Biology. 2009. Vol. 54, iss. 7. P. 1532 – 1543. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02190.x

Lozovik P. A., *Zobkov M. B*., *Borodulina G. S*., *Tokarev I. V.* Effects of external water exchange between bays of lakes on chemical indicators of water // Water Resources. 2019. Vol. 46, iss. 1. P. 91 – 101. https://doi.org/10.31857/s0321-059646191-101

Read D. S., *Gweon H. S.*, *Bowes M. J.*, *Newbold L. K.*, *Field D.*, *Bailey M. J.*, *Griffiths R. I.* Catchment-scale biogeography of riverine bacterioplankton // The ISME Journal. 2015. Vol. 9, iss. 2. P. 516 – 526. https://doi.org/10.1038/ismej.2014.166

Zhang L., *Zhong M.*, *Li X.*, *Lu W.*, *Li J.* River bacterial community structure and co-occurrence patterns under the influence of different domestic sewage types // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 266. Article number 110590. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110590

Zhao J., *Peng W.*, *Ding M.*, *Nie M.*, *Huang G.* Effect of water chemistry, land use patterns, and geographic distances on the spatial distribution of bacterioplankton communities in an anthropogenically disturbed riverine ecosystem // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. Article number 1089. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.633993

Original Article
https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-292-306

Bacterioplankton status in the Lososinka River (a tributary of Lake Onego) and water quality by microbiological indicators

E. M. Makarova ✉, **E. V. Tekanova, N. M. Kalinkina**

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
50 Prosp. Aleksander Nevsky, *Petrozavodsk 185030*, *Russia*

Received: 22 December 2021 / revised: 11 May 2022 / accepted: 28 June 2022

Abstract. The results of our bacterioplankton study (total abundance; saprophytic, hydrocarbon oxidizing and phenol resistant bacteria; total microbial number, and coliform bacteria) in an urbanized tributary of Lake Onego in 2015 are presented. The lower reaches of the Lososinka River flow across the territory of Petrozavodsk city (Karelia) and receive 14 untreated drains of the urban storm sewers. Differences in the temporal abundance dynamics of bacteria which are the indicators of oil pollution, sanitary condition and saprobity were found in the reference and urban parts of the river. These changes are not related to the hydrological and temperature regime of the river and reflect the influence of the pollutant drainage from the urban area on the formation of the river bacterial community. A significant increase in all studied indicators of the quantitative development of bacterioplankton in the urban part of the river as compared to the reference part was revealed. The number of heterotrophic bacteria of various ecological-trophic groups decreases in the lake water by 8–16 times due to dilution, as early as 500 m from the mouth of the river. A significant decrease in the numbers of hydrocarbon oxidizing bacteria in the river water and an increase in sanitary-indicative microorganisms are shown to occur over four years. The Lososinka River on the territory of the Petrozavodsk city is assessed as polluted with oil products and organic matter of fecal origin and unsuitable for recreation according by the level of indicator bacteria.
Keywords: Lososinka River, Onego Lake, pollution, bacterioplankton, bioindication, water quality, recreation

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Makarova E. M., Tekanova E. V., Kalinkina N. M. Bacterioplankton status in the Lososinka River (a tributary of Lake Onego) and water quality by microbiological indicators. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2022, no. 3, pp. 292–306 (in Russian). https://doi.org/10.35885/1684-7318-2022-3-292-306

REFERENCES

Bioindikacija jekologicheskogo sostojanija ravninnyh rek. Pod red. O. V. Buharina, G. S. Rozenberga [O. V. Buharin, G. S. Rozenberg, eds. Bioindication of the Ecological State of Lowland Rivers]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 407 p. (in Russian).

Garetova L. A., Levshina S. I. Bacterioplankton of river ecosystems of mountain-taiga zone. *Inland Water Biology*, 2007, no. 4, pp. 25–33 (in Russian).

✉ *Corresponding author*. Laboratory of Hydrobiology, Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Elena M. Makarova: https://orcid.org/0000-0003-0219-8092, emm777@bk.ru; Elena V. Tekanova: https://0000-0003-0030-3565, etekanova@mail.ru; Natalia M. Kalinkina: https://0000-0001-6363-0470, cerioda@mail.ru.

Kapustina L. L., Mitrukova G. G. Sanitary-ecological assessment of the water quality of Duderhofsky lakes (St. Petersburg) by the results of long term microbiological observations. *Russian Journal of Applied Ecology*, 2018, Vol. 16, no. 4, pp. 16–21 (in Russian).

Katalog ozer i rek Karelii. *Pod red. N. N. Filatova*, *A. V. Litvinenko* [N. N. Filatov, A. V. Litvinenko, eds. Catalogue of Lake and Rivers of Karelia]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences Publ., 2001. 290 p. (in Russian).

Kopylov A. I., Kosolapov D. B., Romanenko A. V., Kosolapova N. G., Mylnikova Z. M., Mineeva N. M., Krylov A. V. Heterotrophic microorganisms in trophic chains of river ecosystems. *Biology Bulletin Reviews*, 2006, vol. 126, no. 3, pp. 273– 284 (in Russian).

Krupnejshie ozera-vodohranilishha severo-zapada evropejskoj territorii Rossii: *sovremennoe sostojanie i izmenenija jekosistem pri klimaticheskih i antropogennyh vozdejstvijah*. *Pod red. N. N. Filatova* [N. N. Filatov, ed. The Large Lakes-reservoirs of the North-West European Part of Russia: Current State and Changes of Ecosystems Under Climate Variability and Anthropogenic Impact]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences Publ., 2015. 376 p. (in Russian).

Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. *Metody izucheniya vodnykh mikroorganizmov* [Methods of Study of Aquatic Organisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 288 p. (in Russian).

MUK 4.2.1884-04. *Sanitarno-mikrobiologicheskii i sanitarno-parazitologicheskii analiz vody poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov*: *Metodicheskie ukazaniya* [MUK 4.2.1884-04. Sanitary-Microbiological and Sanitary-Parazitological Analysis of Water in Surface Water Bodies: Methodical instructions]. Moscow, Rospotrebnadzor Publ., 2004. 41 p. (in Russian).

News. *Upravlenie federal'noi sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitelei i blagopoluchiia cheloveka po Respublike Kareliia*. Petrozavodsk, 2021. Available at: https://10.rospotrebnadzor.ru/search/index.php?q=кишечная+палочка&where=&how=d&PAGEN_1=2 (accessed 23 November 2021) (in Russian).

Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Braginskii L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I., Klenus V. G. Comprehensive ecological classification of the quality of surface land waters. *Hydrobiological Journal*, 1993, vol. 29, no. 4, pp. 62–76 (in Russian).

Pavlova O. A. The state of phytoplankton of small water bodies in St. Petersburg under the influence of the urbanized landscape. *Regional Ecology*,1999, no. 4, pp. 70–74 (in Russian).

Potaenko Yu. S. Abundance, biomass and production of bacterioplankton. In: *Eksperimental'nye i polevye issledovaniya biologicheskih osnov produktivnosti ozer* [Experimental and Field Studies of the Biological Foundations of Lake Productivity]. Leningrad, Nauka Publ., 1979, pp. 80–102 (in Russian).

Rodina A. G. *Metody vodnoy mikrobiologii: prakticheskoe rukovodstvo* [Methods of Aqueous Microbiology]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 364 p. (in Russian).

Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem. *Pod red. V. A. Abakumova* [V. A. Abakumov, ed. Handbook on Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystems]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992. 345 p. (in Russian).

SanPiN 2.1.4.1175-02. *Hygienic Requirements for Water Quality in Decentralized Water Supply. Sanitary Protection of Sources*. Moscow, Ministry of Health of the Russia Publ., 2003. 20 p. (in Russian).

SanPiN 2.1.5.980-00. *Water Disposal of Populated Areas, Sanitary Protection of Water bodies. Hygienic Requirements for the Protection of Surface Waters*. Moscow, Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Ministry of Health of Russia Publ., 2000. 18 p. (in Russian).

Tekanova E. V., Makarova E. M. Ecological and sanitary state of the surf littoral of Lake Onego. *Bioindication in Monitoring of Freshwater Ecosystems III*: *Proceedings of IIInd International Conference*. Saint Petersburg, Svoe izdatel'stvo, 2017, pp. 322–324 (in Russian).

Tekanova E. V., Makarova E. M., Kalinkina N. M. An assessment of the condition of the water of lake Onego inflowing streams under human impact influence using microbiological and toxicological parameters. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the RAS*, 2015, no. 9, pp. 44–52 (in Russian). http://dx.doi.org/10.17076/lim35

Tekanova E. V., Makarova E. M., Kalinkina N. M. Environmental assessment of water quality in an urbanized tributary of Lake Onega by chemical indicators. *Water and Ecology: Problems and Solutions*, 2021, vol. 87, no. 3, pp. 75–84 (in Russian). https://doi.org/10.23968/2305-3488.2021.26.3.75-84

Timakova T. M. Microbiological assessment of the state of urbanized tributaries of the Petrozavodsk Bay of Onega Lake. In: *Vodnye ob'ekty goroda Petrozavodska*: Uchebnoe posobie. [Water Bodies of the City of Petrozavodsk: Textbook]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences Publ., 2013, pp. 74–77 (in Russian).

Kemp P. F., Cole J. J., Sherr B. F., Sherr E. B., eds. *Handbook of Methods in Aquatic Microbial Ecology*. Washington, CRC Press, 1993. 800 p.

Lear G., Boothroyd I. K. G., Turner S. J., Roberts K., Lewis G. D. A comparison of bacteria and benthic invertebrates as indicators of ecological health in streams. *Freshwater Biology*, 2009, vol. 54, iss. 7, pp. 1532–1543. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02190.x

Lozovik P. A., Zobkov M. B., Borodulina G. S., Tokarev I. V. Effects of external water exchange between bays of lakes on chemical indicators of water. *Water Resources*, 2019, vol. 46, iss. 1, pp. 91–101. https://doi.org/10.31857/s0321-059646191-101

Read D. S., Gweon H. S., Bowes M. J., Newbold L. K., Field D., Bailey M. J., Griffiths R. I. Catchment-scale biogeography of riverine bacterioplankton. *The ISME Journal*, 2015, vol. 9, iss. 2, pp. 516–526. https://doi.org/10.1038/ismej.2014.166

Zhang L., Zhong M., Li X., Lu W., Li J. River bacterial community structure and co-occurrence patterns under the influence of different domestic sewage types. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 266, article number 110590. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110590

Zhao J., Peng W., Ding M., Nie M., Huang G. Effect of water chemistry, land use patterns, and geographic distances on the spatial distribution of bacterioplankton communities in an anthropogenically disturbed riverine ecosystem. *Frontiers in Microbiology*, 2021, vol. 12, article number 1089. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.633993